

Revue de l'étude portant sur l'évolution des usages sur les réseaux de télécommunications sans-fil et le dimensionnement des réseaux

Avis du comité consultatif

L'Autorité a confié au cabinet de conseil Analysys Mason la mission de réaliser une étude portant sur l'évolution des usages sur les réseaux de télécommunications sans fil et les besoins en dimensionnement des réseaux sans fil qui en découlent.

Afin de disposer d'une analyse critique des résultats de l'étude, l'Autorité a été appuyée, tout au long de la conduite de l'étude, en qualité de conseil, par un comité consultatif de relecture composé de 4 experts académiques, listés ci-dessous :

- **Clément Marquet**, Chargé de recherche au Centre de Sociologie de l'Innovation, Mines Paris – PSL, *expert en sociologie du numérique et des infrastructures*.
- **James F. Kurose**, Professeur à l'Université de Massachusetts (E.U), Chercheur invité à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI – Sorbonne), *expert réseaux de télécommunications, réseaux de capteurs et multimédia*.
- **Jean-Samuel Beuscart**, Professeur à Sciences Po Medialab, *expert en sociologie du numérique*.
- **Marios Kountouris**, Professeur à EURECOM, France, *expert en communications sans fil, modélisation et analyse des réseaux mobiles*.

La mission du comité consultatif a été de :

- Evaluer l'approche méthodologique et les hypothèses retenues par Analysys Mason ;
- Formuler des recommandations sur des améliorations, des ajustements ou des enrichissements possibles que Analysys Mason pourrait réaliser à la demande de l'Autorité et selon son appréciation ;
- Accompagner l'Autorité dans le travail de relecture critique et de mise en perspective des résultats de l'étude par rapport à son contexte et ses objectifs.

Le contenu de la revue ci-dessous constitue l'avis collégial du comité sur l'étude et ses enseignements.

Sur l'apport et la valeur ajoutée de l'étude au regard de ses principaux volets

L'étude met en place une démarche cohérente et ambitieuse afin de produire des estimations du besoin en sites d'infrastructures de réseau mobile en fonction de scénarios d'évolution des usages, d'une part, d'évolution des réseaux et de l'attribution des fréquences, d'autre part. Ces scénarios sont ensuite précisés à l'échelle de géotypes et évalués à l'aune de leur empreinte carbone.

Dans l'ensemble, ce rapport final est satisfaisant et les résultats obtenus sont présentés de manière convaincante et lisible.

En ce qui concerne l'estimation et la projection des usages des réseaux sans fil :

En premier lieu, l'estimation et la projection des usages des réseaux sans fil, les cas d'usage identifiés ainsi que leurs caractéristiques spécifiques (notamment les profils de trafic, les volumes associés et leur impact sur l'étude) ont été bien développés, corrigés et mis à jour. À ce stade, cette partie peut être

considérée comme globalement solide. Les prévisions de la demande par cas d'usage reposent sur une étude bibliographique rigoureuse, ces estimations articulent et extrapolent des données issues de quelques acteurs de référence (Ericsson, Sandvine, le prestataire lui-même, IPBT), construites selon des méthodologies et sur des périmètres différents. Cette méthode est classique et largement utilisée dans les publications (surtout de provenance académique). Les divergences et les limites de ces chiffres ne sont pas vraiment analysées. Il s'agit donc d'une approximation acceptable construite elle-même à partir d'approximations raisonnables, à manipuler comme telle. Le travail d'Analysys Mason n'a pas pour objectif de remettre en question leur dynamique interne, par conséquent, il est difficile de situer comment se placent les différents scénarios par rapport aux prévisions de la filière.

La construction des scénarios d'usages permet de contraster efficacement les sentiers d'évolution possibles de la demande. Elle aboutit à proposer un scénario de sobriété (maintien des usages actuels), un autre de continuation de la pente actuelle, et deux scénarios d'accélération des usages numériques (scénarios « numérisation accrue » et « usages disruptifs ») qui permettent un raisonnement intuitif et efficace. L'élaboration de ces scénarios est solide tout en restant assez grossière. Elle repose sur une typologie des usages convaincante, articulant usages grand public et industriels, établis et émergents. Les mécanismes conduisant aux différents scénarios sont laissés en dehors de l'étude. Le rapport ne présente pas les différents facteurs (sociaux, économiques, technologiques) susceptibles d'orienter vers l'un ou l'autre des scénarios. Cela se comprend dans le cadre de l'étude, mais ces mécanismes manquent un peu au moment de rendre compte des très forts écarts entre les scénarios « médian » (croissance stable) d'une part et « numérisation accrue » et « usages disruptifs » (croissance accélérée) d'autre part. De même, les nuances entre les scénarios « numérisation accrue » et « usages disruptifs » apparaissent au final assez théoriques.

Outre ce point qui peut gagner en précision, il semble que le travail d'estimation et de projection des usages sous différents scénarios est original par rapport à ce qui est disponible dans le monde des télécommunications. Cela peut être utile à la fois pour dimensionner le réseau mais aussi pour examiner les risques que pourraient occasionner les scénarios les plus extrêmes en termes d'empreinte matérielle. L'étude apporte également une perspective originale en essayant d'analyser les effets de rétroaction entre usages et réseaux.

En ce qui concerne la modélisation des réseaux sans fil :

La modélisation des réseaux sans fil, pour répondre à la demande, a exprimé le résultat sous la forme de nombre de sites par opérateur (en prenant en compte le nombre actuel d'opérateurs) requis pour le trafic acheminé par les réseaux cellulaires, ce qui permet d'évaluer les nouvelles infrastructures nécessaires. Cette modélisation suit une approche standard, bien établie dans la littérature scientifique et dans la pratique. Elle peut donc être jugée suffisante dans le cadre de ce livrable.

La modélisation des scénarios réseaux est claire et couvre une grande variété d'options technologiques (maintien du parc, optimisation, mutualisation, ajout de différentes nouvelles fréquences), finement discutées. La présentation des résultats en termes de nombre de sites mobiles, rapportée à la croissance actuelle du nombre de sites, est heuristique et permet une bonne appréhension des différents scénarios.

Les experts du Comité relèvent cependant les limitations suivantes :

- L'absence d'analyse similaire concernant l'ouverture de la partie haute de la bande 6 GHz au Wi-Fi.
- La non prise en compte des réseaux mobiles locaux répondant à des usages professionnels. Certaines technologies clés, notamment celles relevant de la couche physique des réseaux cellulaires (comme abordé dans les travaux de normalisation de la 5G et au-delà), ne sont pas modélisées avec un niveau de détail adéquat. Un effort est réalisé pour prendre en compte les stations de base multi-antennes, mais seules des configurations symétriques sont considérées, ce qui limite la représentativité des résultats (notamment en termes de finesse).

En ce qui concerne l'évaluation de l'impact carbone des différents scénarios :

L'impact carbone des différentes combinaisons de scénarios pour ce type d'étude est plus que bienvenu et ajoute une donnée intéressante au modèle ; cette évaluation environnementale n'est pas au centre de l'analyse développée. Bien que cette évaluation offre un éclairage important et constitue une base pour systématiser et améliorer l'intégration de l'analyse des conséquences environnementales dans de futures études, les experts relèvent les limitations suivantes :

- L'évaluation est monocritère (réduite uniquement au changement climatique), avec un périmètre restreint aux terminaux et réseaux ;
- L'étude montre que l'impact principal étant du côté des terminaux, les scénarios réseau n'affectent que marginalement le coût carbone du niveau de numérisation. Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue que les scénarios de croissance nécessitent de nombreuses transformations du point de vue réseau pour pouvoir être réalisés (optimisations, mutualisation etc.) voire ajout de fréquence, et qu'en cela les investissements réalisés pour accroître la capacité des réseaux peuvent avoir une influence sur le développement des usages qu'il rend possible et donc indirectement sur l'équipement en terminaux des utilisateurs. Ainsi bien que l'évaluation carbone repose sur une approche d'Analyse par Cycle de Vie (ACV), l'impact n'est pas évalué selon une analyse conséquentielle permettant d'objectiver l'impact de différentes stratégies de développement du réseau et d'utilisation du spectre.
- Le rapport fournit ainsi une évaluation de l'empreinte carbone raisonnable, fondée sur les données de l'industrie, mais ces données – bien que référencées – sont peu justifiées et difficiles à discuter (exemple : une incertitude sur la connaissance des données d'impact environnemental des nouveaux composants réseaux associés à des fréquences plus élevées comme la bande 6 GHz).

En somme, bien qu'instructive, l'évaluation de l'impact carbone reste préliminaire et relativement approximative sur certains aspects, ces résultats doivent être interprétés avec prudence particulièrement dans un domaine aussi sensible et controversé, aux implications socio-économiques significatives.

Sur la mise en perspective des résultats de l'étude par rapport à son contexte et ses objectifs

L'étude fournit des résultats facilement mobilisables pour la prévision de l'évolution de la congestion des réseaux et la gestion des fréquences. Les prévisions, formulées en termes de nombres de nouveaux sites par opérateur et par an, sont assez réalistes pour les scénarios « sobriété des usages » et « médian » et utiles pour imaginer des scénarios d'explosion des usages (« numérisation accrue » et « usages disruptifs »). Ceci dit, le choix et l'estimation de la probabilité des scénarios d'usages sont laissés à l'appréciation du lecteur. L'évolution du nombre de sites permet efficacement de rendre compte des efforts à faire par les opérateurs pour suivre la demande, et de déterminer la crédibilité des efforts à fournir du point de vue de l'existant.

Le message principal qui se dégage concernant l'intérêt porté sur le haut de la bande 6 GHz pour les réseaux mobiles est relativement clair : l'intégration du haut de la bande 6 GHz dans les réseaux cellulaires permet une réduction significative du nombre de sites radio nécessaires, un gain d'autant plus marqué que les usages considérés sont exigeants.

Plus généralement, les enseignements dégagés contribuent à apporter des éléments de réponse aux questionnements par l'étude, notamment :

- La congestion probable des réseaux actuels hors scénario de sobriété ;
- Les gains importants de l'ajout du haut de la bande 6 GHz ;
- Les « réserves » importantes de capacités qui résident dans l'optimisation des sites et des fréquences existantes (refarming, optimisation, mutualisation). Ces gains sont souvent inférieurs à ceux apportés par l'ajout de fréquences de la bande 6 GHz, mais supérieurs à ceux liés à l'ajout d'autres fréquences ;
- L'ajout du haut de la bande 6 GHz semble offrir un gain significatif dans la perspective d'une « numérisation accrue » ;

- L'ajout de boucles de rétroaction permet des exercices de pensée intéressants, notamment imaginer une limitation capacitaire des usages qui contraindrait à la sobriété.

Néanmoins, ces résultats sont soumis à une certaine incertitude notamment la dépendance des scénarios D et E au scénario C. Si l'effet de cumulativité est discuté à l'échelle du scénario D et travaillé de façon pertinente pour identifier les effets de chacune des fréquences, le scénario C portant sur la mutualisation est inclus dans la suite des résultats alors que les auteurs de l'étude insistent sur les précautions avec lesquelles il doit être pris en compte. Cette réserve est fondée : en pratique, la complexité opérationnelle liée à la mutualisation pourrait neutraliser une partie des gains attendus. Afin d'isoler plus finement l'effet de chaque composante, il aurait été utile d'introduire un scénario supplémentaire, comme le scénario D : « Ajout de nouvelles bandes de fréquences, à l'exception du haut de la bande 6 GHz » mais sans mutualisation accrue des réseaux. Même si l'on peut s'attendre à ce que ce scénario ne modifie pas substantiellement les conclusions globales, il offrirait un éclairage complémentaire en dissociant l'impact des nouvelles bandes de celui de la mutualisation.

Sur les limites de l'étude, les point d'amélioration et les perspectives d'enrichissement possible

Grâce aux allers-retours avec le comité, les livrables de l'étude ont gagné en lisibilité et en explicitation. Cependant, comme tout modèle, celui-ci comporte des limites et des incertitudes :

- L'étude pourrait mieux encore souligner les niveaux de crédibilité et de solidité des différents scénarios de la demande (besoin d'explicitier les mécanismes sociotechniques sous-jacents aux différents scénarios) ;
- Limitations sur la modélisation de la partie Wi-Fi de l'étude :
 - o Le scénario d'une attribution partielle du haut de la bande 6 GHz au Wi-Fi n'a pas été investigué ;
 - o Dans l'étude, l'interaction entre usages et performance des réseaux – lorsque Wi-Fi et réseaux cellulaires coexistent – est représentée de manière simplifiée. Les résultats chiffrés doivent dès lors être considérés comme des bornes (inférieures ou supérieures selon les cas), au mieux comme des valeurs médianes. L'impact réel du Wi-Fi selon son évolution technologique, sa pénétration et son déploiement (notamment les risques d'interférence entre points d'accès Wi-Fi voisins) devraient être prises en compte de façon plus approfondie dans la modélisation et quantifier l'impact sur le besoin en stations de base supplémentaires pour le mobile ;
 - o Des incertitudes sur l'approche théorique de la matrice de passage (notamment le déport du trafic entre le Wi-Fi et le cellulaire).
- L'interférence due à la densification cellulaire n'est pas prise en compte. Or celle-ci influence fortement la couverture et les débits ;
- Des incertitudes inhérentes aux données de projection de la demande pour chaque cas d'usage ;
- Des incertitudes associées aux données de l'impact carbone (données d'émission du carbone embarqué, consommation énergétique) ;
- Limite de l'approche d'évaluation de l'impact carbone (ACV non conséquentielle), les conclusions sur ce volet doivent être maniées avec prudence.

Avis collégial des experts du comité consultatif de l'étude, établi le 30/06/2025.

- Clément Marquet
- James F. Kurose
- Jean-Samuel Beuscart
- Marios Kountouris